

**В. І. БЕНДЮГ, Б. М. КОМАРИСТА****ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ПРОДУКТУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ**

Життєвий цикл розглядає кожен продукт чи сервісну систему в межах поняття «від колиски до могили». Метод оцінки життєвого циклу продукту є одним з сучасних підходів оцінки тиску на природу. При виконанні оцінки життєвого циклу враховують всі вхідні та вихідні потоки. Потоки зазвичай групують на матеріальні та енергетичні потоки. Матеріальні потоки – це витрата сировини на різних етапах життєвого циклу продукту. Енергетичні потоки – це витрати енергоресурсів на різних стадіях життєвого циклу чи оцінка вхідних та вихідних потоків в енергетичних одиницях. Виявлення та оцінка енергетичних потоків є невід'ємною частиною методів оцінки впливу життєвого циклу. Найбільші витрати енергетичних ресурсів протягом життєвого циклу відбуваються на етапі виробництва продукту. Тому ми пропонуємо оцінювати енергетичні потоки саме на етапі виготовлення продукту.

При аналізі потоків вони поділяються на найменші одиничні потоки. Для інвентаризації одиничних енергетичних потоків пропонуємо використати так звану повну енергоємність продукту. Повна енергоємність продукту враховує витрати енергоносіїв, які були використані при видобутку сировини та виготовленні продукту, враховує енергоємність основних виробничих фондів, енергоємність відтворення робочої сили під час виробництва продукту, а також енергоємність заходів, які пов'язані з охороною навколишнього середовища в процесі виробництва.

Для оцінки енергоємності охорони навколишнього середовища, енергоресурсів та вихідної продукції, сировини і матеріалів запропоновано три відповідних безрозмірних індексних показника. На основі вище наведених індексних показників розраховуємо узагальнений індекс енергоємності продукції як узагальнену функцію бажаності Гарінгтона. Отримане значення індексу енергоємності продукції за допомогою функції бажаності Гарінгтона переводимо до стандартної безрозмірної шкали бажаності від 0 до 1 і отримуємо унітарний індекс виробничої енергоємності продукційної системи.

В рамках концепції оцінки життєвого циклу продукту запропонована нами методика визначення рівня виробничої енергоємності дозволяє врахувати більшість основних одиничних енергетичних потоків на етапі виробництва продукту. Отриманий унітарний індекс дозволить порівнювати різні продукційні системи за рівнем їх енергоефективності, та за допомогою аналізу одиничних енергетичних потоків дозволить проводити оптимізацію виробництва та знаходити ланки потенційно придатні для зменшення рівня енерговитрат.

**Ключові слова:** життєвий цикл, оцінка життєвого циклу, вплив життєвого циклу, енергоємність продукту, продукційна система, індексна оцінка, індекс виробничої енергоємності продукту.

**В. И. БЕНДЮГ, Б. Н. КОМАРИСТА****ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПРОДУКТА И ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ**

Жизненный цикл рассматривает каждый продукт или сервисную систему в рамках понятия «от колыбели до могилы». Метод оценки жизненного цикла продукта является одним из современных подходов оценки влияния на природу. При выполнении оценки жизненного цикла учитывают все входящие и исходящие потоки. Потоки обычно группируют на материальные и энергетические потоки. Материальные потоки – это расход сырья на различных этапах жизненного цикла продукта. Энергетические потоки – это затраты энергоресурсов на разных стадиях жизненного цикла или оценка входных и выходных потоков в энергетических единицах. Выявление и оценка энергетических потоков является неотъемлемой частью методов оценки воздействия жизненного цикла. Наибольшие расходы энергетических ресурсов в течение жизненного цикла происходят на этапе производства продукта. Поэтому мы предлагаем оценивать энергетические потоки именно на этапе изготовления продукта.

При анализе потоков они делятся на элементарные единичные потоки. Для инвентаризации единичных энергетических потоков предлагаем использовать так называемую полную энергоёмность продукта. Полная энергоёмность продукта учитывает расход энергоносителей, которые были использованы при добыче сырья и изготовлении продукта, учитывает энергоёмность основных производственных фондов, энергоёмность воспроизводства рабочей силы при изготовлении продукта, а также энергоёмность мероприятий, связанных с охраной окружающей среды в процессе производства.

Для оценки энергоёмности охраны окружающей среды, энергоресурсов и выходной продукции, сырья и материалов предложено три соответствующих безразмерных индексных показателя. На основе приведенных выше индексных показателей рассчитываем обобщенный индекс энергоёмности продукции как обобщенную функцию желательности Харрингтона. Полученное значение индекса энергоёмности продукции с помощью функции желательности Харрингтона переводим в стандартную безразмерную шкалу желательности от 0 до 1 и получаем унитарный индекс производственной энергоёмности продукционной системы.

В рамках концепции оценки жизненного цикла продукта предложенная нами методика определения уровня производственной энергоёмности позволяет учесть большинство основных единичных энергетических потоков на этапе производства продукта. Полученный унитарный индекс позволит сравнивать различные продукционные системы по уровню их энергоэффективности, и с помощью анализа единичных энергетических потоков позволит проводить оптимизацию производства и находить звенья потенциально пригодные для уменьшения уровня энергозатрат.

**Ключевые слова:** жизненный цикл, оценка жизненного цикла, влияние жизненного цикла, энергоёмность продукта, продукционная система, индексная оценка, индекс производственной энергоёмности продукта.

**V. I. BENDIUG, B. M. KOMARYSTA****PRODUCT LIFECYCLE AND ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION**

The life cycle examines each product or service system within the concept of "cradle-to-grave". The method of assessing the product life cycle is one of the modern approaches to assessing the pressure on nature. When performing the life cycle assessment, all incoming and outgoing flows are considered. Flows are usually grouped into material and energy streams. Material flows are the consumption of raw materials at different stages of the product's lifecycle. Energy streams are the costs of energy resources at different stages of the life cycle or the estimation of input and output flows in energy units.

Detection and estimation of energy flows is an integral part of the methods for assessing the life cycle impact. The largest expenditures of energy resources during the life cycle occur at the stage of product manufacturing. Therefore, we propose to estimate energy flows exactly at the stage of manufacturing the product.

In the analysis of flows, they are divided into the smallest single streams. To inventory single energy flows, we suggest using the so-called total energy consumption of the product. The total energy consumption of the product takes into account the costs of energy carriers used in the extraction of raw materials and the manufacturing of the product, takes into account the energy intensity of the main productive assets, the energy intensity of the reproduction of labor during the manufacturing of the product, as well as the energy intensity of measures related to environmental protection in the product system.

To assess the energy intensity of environmental protection, energy resources and output products, raw materials and materials, three relevant dimensionless indexes are proposed. Based on the above index values, we calculate the generalized index of energy intensity of the product as a generalized Harrington desirability function. The obtained value of the index of energy intensity of products using the function of the desirability of Harrington is converted to the standard dimensionless scale of desirability from 0 to 1 and we obtain a unitary index of industrial energy intensity of a product.

In the framework of the concept of product life cycle assessment, the method for determining the level of industrial energy consumption allows us to consider most of the main unit energy flows at the product manufacturing stage. The obtained unitary index will allow comparing different product systems by their level of energy efficiency, and by analyzing individual energy flows, it will allow optimizing of product and finding links potentially suitable for reducing energy consumption.

**Keywords:** lifecycle, lifecycle assessment, lifecycle impact, energy consumption of a product, product system, index estimation, index of industrial energy intensity of a product.

**Вступ.** Існуючий нині комплекс глобальних екологічних проблем виник внаслідок здійснення людством процесів життєдіяльності без урахування можливостей біосфери компенсувати антропогенний вплив, а також в результаті вироблення стратегії розвитку виходячи з соціально – економічних пріоритетів без урахування обмеженості основних природних ресурсів. Наростання глобальних екологічних проблем, виникнення локальних криз і катастроф антропогенного походження, виникнення загрози людства вижити призвели до необхідності перегляду системи взаємовідносин «природа – людина», пошуку шляхів їх гармонізації та врахування природних меж, за які не можна виходити. Можливість здійснення такого переходу стає реальним шляхом виявлення причин і вироблення механізмів узгодження шляху розвитку з об'єктивними законами існування природи і суспільства.

Розвиток виробництва і постійне зростання масштабів господарської діяльності покликані задовольняти швидко зростаючі людські потреби. Для цього людство повинне використовувати дедалі більшу кількість природних ресурсів, що в свою чергу зумовлює тотальне посилення антропогенного тиску на довкілля та порушення рівноваги в навколишньому природному середовищі. А це, в свою чергу, призводить до загострення соціально-економічних проблем, особливо в слаборозвинутих країнах, та країнах що розвиваються. Одночасно з вичерпанням запасів невідновлюваних сировинних та енергетичних ресурсів посилюється забруднення довкілля, особливо водних ресурсів та атмосферного повітря, зменшуються площі лісів і родючих земель, зникають окремі види рослин, тварин тощо. Все це зрештою підриває природно-ресурсний потенціал суспільного виробництва і негативно позначається на здоров'ї людини.

Одним з сучасних підходів для можливості оцінки та корегування тиску на природу, який спричинений масштабним виробництвом різноманітної продукції, є метод оцінки життєвого циклу продукту. В основу його покладений новий підхід до виробництва з використанням поняття життєвого циклу продукту або розгляд впливу на навколишнє середовище кожного продукту чи процесу в межах поняття «від колиски до могили» (англ. «Cradle-to-Grave»).

**Поняття життєвого циклу.** Життєвий цикл продукту чи сервісної системи (англ. Lifecycle) – це сукупність взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану продукції від початку дослідження та обґрунтування розроблення до припинення експлуатації виробу, застосування (зберігання) та утилізації, див. рис. 1 [1].

Під терміном продукт (сервісна система) тут мається на увазі матеріальний результат трудової діяльності або виробничих процесів, що має корисні властивості і призначений для використання споживачем [2].



Рисунок 1 – Фази оцінки життєвого циклу

Зазвичай послідовними етапами життя кожного виробу є:

- наукове відкриття у даній сфері;
- визначення можливості створення виробу;
- технічне втілення задуму шляхом розробки видів виробів;
- освоєння їх у виробництві;
- виготовлення в промислових умовах;
- споживання (експлуатація);
- утилізація.

Ці етапи повторюються в житті кожного виду продукції. Оскільки, різні повторення, що піддаються визначенню, позначають терміном «цикл», то для характеристики стадій, котрі послідовно повторюються, й етапів у житті виробів використовують термін «життєвий цикл продукції» (англ. Product Lifecycle).

Визначення життєвого циклу продукції і типовий зміст робіт на різних його стадіях встановлюють державні стандарти, відповідно до яких весь життєвий цикл поділяють на наступні основні стадії [3]:

- видобуток сировини;
- обробка сировини, виготовлення поміжних продуктів та виготовлення виробу;
- транспортування або розповсюдження продукту з доставкою до споживача;
- використання продукту споживачем;
- утилізація або відновлення продукту після його корисного терміну служби.

**Оцінювання життєвого циклу.** Оцінювання життєвого циклу продукції (англ. Lifecycle Assessment) – один з найпоширеніших методів кількісного визначення екологічності продукції. Він передбачає оцінку потенційних несприятливих екологічних аспектів на різних стадіях життєвого циклу та потенційних аспектів, пов'язаних із безпосереднім використанням продукту (або послуги).

Застосування цього інструменту дає змогу фахівцям визначати вплив продукту протягом його життєвого циклу на зміну клімату, виснаження озонового шару, збіднення ресурсів і т.д. Порівняння на такій основі декількох варіантів продукційних систем дозволяє обґрунтовано прийняти рішення, визначитись із вибором, який якнайменше впливатиме на здоров'я людини, довкілля та виснаження ресурсів [4–5].

Введення Міжнародною організацією стандартизації стандартів серії ISO 14000 «Екологічне керування», а також стандартів серії ISO 14040 – «Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу» та надання їм чинності в Україні дозволяє говорити про збільшення зусиль на національному рівні щодо покращення екологічності продукції, екологізації виробництва та позитивні кроки на шляху до сталого розвитку суспільства.

Це обумовлює актуальність досліджень, спрямованих на розроблення та впровадження методики оцінювання екологічності продукції, впливу продукційних систем протягом життєвого циклу на людину й оточуюче її середовище.

Оцінювання життєвого циклу – це методологічний інструмент, що кількісно застосовує концепцію мислення життєвого циклу для екологічного аналізу діяльності, пов'язаної з технологічними або продукційними системами. Оцінка життєвого циклу включає усі виробничі процеси й послуги пов'язані з продуктом протягом його життєвого циклу, від придбання сировини до утилізації. Повний життєвий цикл часто називають «від колиски до могили». Такі види діяльності як транспортування, зберігання, продаж тощо включають в оцінювання у міру можливості.

**Складові методу оцінки життєвого циклу.** При оцінці життєвого циклу для кожного окремого процесу оброблення записують «входи» – використання ресурсів, сировини, компонентів і продуктів, енергоносіїв тощо, та «виходи» – викиди у повітря,

воду й ґрунт, відходи, побічні продукти. Структура процедури оцінки життєвого циклу в залежності від мети та сфери застосування включає три взаємопов'язані фази [2]:

- проведення інвентаризації відповідних вхідних та вихідних потоків продукційної системи (англ. Inventory);
- оцінювання потенційних впливів на навколишнє середовище, які пов'язані з цими вхідними та вихідними потоками (англ. Evaluating);
- інтерпретація результатів інвентаризації та етапів впливу з урахуванням мети дослідження (англ. Interpreting).

На основі оцінки життєвого циклу відбувається прийняття рішень (див. рис. 2).

В Україні приділяється важлива роль проблемі охорони навколишнього середовища та оцінці можливих впливів, пов'язаних з виготовленою і споживаною продукцією, та підвищується інтерес до розробки методів, спрямованих на зниження цих впливів. У зв'язку з цим прийнятий стандарт ДСТУ ISO 14040:2013, що імплементує міжнародний стандарт ISO 14040:2006, в якому описані принципи та структура оцінювання життєвого циклу [6].

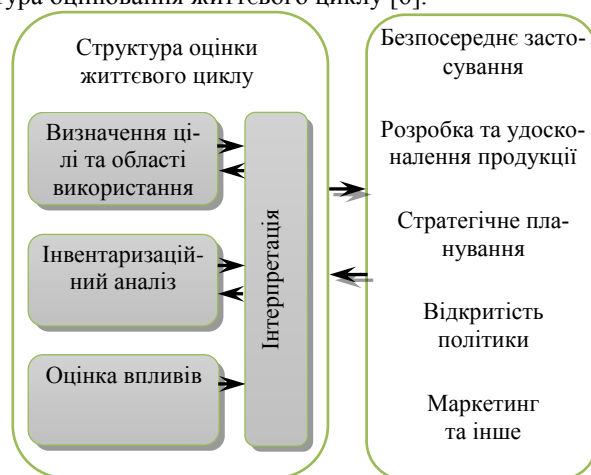


Рисунок 2 – Стадії життєвого циклу продукції

Згідно цього стандарту основними категоріями впливів на навколишнє середовище є використання ресурсів, здоров'я людини та екологічні наслідки.

Метод оцінки впливу життєвого циклу дає можливість [7]:

- поліпшити екологічні аспекти продукту в різні моменти його життєвого циклу;
- приймати рішення в промислових, державних або недержавних організаціях – як (наприклад, при стратегічному плануванні, визначенні пріоритетів, проектуванні та перепроєктуванні продукційної системи);
- обирати відповідні показники екологічної ефективності, включаючи методи вимірювань;
- маркетингу (наприклад, при заяві про екологічний позов, пов'язаний з системою екологічного маркування або декларацією про екологічну чистоту продукції).

### Продукційна система та одиничні процеси.

Межі продукційної системи визначають одиничні процеси, що включаються в модельовану систему. Ідеальну продукційну систему слід моделювати таким чином, щоб вхідні та вихідні потоки на її кордоні були елементарними. Так як у багатьох випадках для проведення такого дослідження немає достатнього часу, даних або ресурсів, приймають рішення щодо того, які поодинокі процеси будуть змодельовані в дослідженні і з яким рівнем детальності повинні бути досліджені. Немає необхідності витрачати ресурси на кількісну оцінку вхідних і вихідних потоків, які не призведуть до значної зміни загальних висновків дослідження.

Також приймають рішення щодо того, які викиди в навколишнє середовище і з яким рівнем детальності повинні бути оцінені. Межі системи, визначені на початку, повинні бути уточнені на основі результатів попередніх робіт. Критерії вибору вхідних і вихідних потоків повинні бути легко зрозумілі й описані.

З урахуванням стадій життєвого циклу можна виділити такі одиничні процеси і потоки:

- вхідні і вихідні потоки основної послідовності процесу виготовлення / обробки;
- розподіл / транспортування;
- виробництво і використання палива, електрики і тепла;
- використання і технічне обслуговування продукції;
- видалення продукції та відходів виробництва;
- утилізація використаної продукції (включаючи повторне використання, рециклінг і отримання енергії за рахунок утилізації відходів);
- виробництво додаткових матеріалів;
- виробництво, технічне обслуговування та введення з експлуатації основного обладнання;
- додаткові роботи, такі як освітлення, опалення;
- інші чинники, що відносяться до оцінки впливу (якщо такі є).

Будь-яке рішення про те, щоб не враховувати певні стадії життєвого циклу, процеси або вхідні / вихідні потоки, має бути чітко сформульованим і обґрунтованим. Критерії встановлення меж системи при оцінці життєвого циклу визначають ступінь довіри до результатів дослідження та відповідають за досягнення поставленої мети дослідження.

Кожен з одиничних процесів повинен бути спочатку описаний, щоб визначити:

- де бере початок одиничний процес, з точки зору отримання сировинних матеріалів або напівфабрикатів;
- природу перетворень і операцій, які є частиною одиничного процесу;
- де закінчується одиничний процес з точки зору отримання кінцевої продукції або напівфабрикатів.

Слід вирішити, які вхідні та вихідні дані повинні бути віднесені до іншої продукційної системи, включаючи рішення про розподіл. Система повинна бути описана детально і ясно, щоб інші фахівці могли продублювати інвентаризаційний аналіз.

При визначенні галузі дослідження для інвентаризаційного аналізу вибирають вихідну сукупність вхідних і вихідних потоків. На практиці не завжди треба включати в модель продукційної системи кожен вхідний і вихідний потік. Ідентифікація вхідних і вихідних потоків в / з навколишнього середовища, тобто ідентифікація одиничних процесів, що виробляють вхідні потоки або отримують вихідні потоки, які повинні бути включені до складу досліджуваної продукційної системи, є ітеративним процесом. Початкова ідентифікація зазвичай робиться на основі наявних даних, більш точно вхідні і вихідні потоки ідентифікують після збору додаткових даних у ході проведеного дослідження, а потім піддають аналізу чутливості [8].

Для матеріальних вхідних потоків аналіз починають з вибору досліджуваних вхідних потоків. Такий вибір заснований на ідентифікації вхідних потоків, пов'язаних з кожним з модельованих одиничних процесів. Ця спроба може бути зроблена на основі зібраних даних по конкретну виробничому майданчику або на основі даних з опублікованих джерел. Мета полягає в ідентифікації найбільш важливих вхідних потоків, пов'язаних з кожним одиничним процесом.

Вхідні та вихідні потоки зазвичай групують на матеріальні потоки – витрати сировини на різних етапах життєвого циклу продукту, і енергетичні потоки – витрати енергоресурсів на різних стадіях життєвого циклу чи оцінка вхідних та вихідних потоків в енергетичних одиницях [9–10].

Виявлення та оцінка енергетичних потоків в етапах життєвого циклу є невід'ємною частиною методів оцінки впливу. Зазвичай найбільші витрати енергетичних ресурсів протягом життєвого циклу відбуваються на етапі виробництва продукту. Тому ми пропонуємо оцінювати енергетичні потоки саме на етапі виготовлення продукту.

Для інвентаризації одиничних енергетичних потоків пропонуємо використати так звану повну енергоємність продукту.

Повна енергоємність продукту. Повна енергоємність продукту враховує витрати енергоносіїв, які були використані при видобутку сировини, виготовленні продукту, енергоємність основних виробничих фондів, енергоємність відтворення робочої сили під час виробництва продукту, а також енергоємність заходів, які пов'язані з охороною навколишнього середовища в процесі виробництва. У відповідності з цим повна енергоємність продукції розраховується за наступною залежністю [11–12]:

$$e = e_r + e_m + e_f + e_w + e_e \quad (1)$$

де  $e$  – повна енергоємність продукції, що вимірюється у мегаджоулях на натуральну одиницю (НО) виміру продукту, МДж/НО продукту;

$e_r$  – повна енергоємність енергоресурсів, необхідних для виробництва продукту, МДж/НО продукту;

$e_m$  – повна енергоємність вихідної продукції, сировини та матеріалів, необхідних для виробництва продукту, МДж/НО продукту;

$e_f$  – повна енергоємність основних виробничих фондів, амортизованих під час виробництва продукту, МДж/НО продукту;

$e_w$  – повна енергоємність відтворення робочої сили під час виробництва продукту, МДж/НО продукту;

$e_e$  – повна енергоємність охорони навколишнього середовища під час виробництва продукту, МДж/НО продукту.

Повна енергоємність енергоресурсів, необхідних безпосередньо для виробництва продукту,  $e_r$  у мегаджоулях на натуральну одиницю виміру продукту обчислюють за формулою:

$$e_r = e_p + e_t + e_c + e_i \quad (2)$$

де  $e_p$  – повна енергоємність енергоресурсів, що їх витрачають безпосередньо для виробництва продукту, МДж/НО продукту;

$e_t$  – повна енергоємність енергоресурсів, що їх витрачають на транспортування вихідної продукції, сировини та матеріалів, МДж/НО продукту;

$e_c$  – зниження повної енергоємності продукту за рахунок використання утворених під час виробництва продукту горючих відходів, МДж/НО продукту;

$e_i$  – приріст повної енергоємності, обумовлений імпортом енергоресурсів, МДж/НО продукту.

Повна енергоємність енергоресурсів, що їх витрачають безпосередньо для виробництва продукту,  $e_p$  у мегаджоулях на НО виміру продукту обчислюють за наступною залежністю:

$$e_p = \sum_s e_s b_{u_s} + \sum_i a'_{u_i} b'_{u_i} \quad (3)$$

де  $s$  – індекс виду енергоресурсів;

$e_s$  – повна енергоємність  $s$ -го виду енергоресурсів, МДж/НО продукту;

$b_{u_s}$  – питомі витрати  $s$ -го виду енергоресурсів в основному виробництві, МДж/НО продукту;

$i$  – індекс виду допоміжного виробництва;

$a'_{u_i}$  – питомі витрати  $i$ -го виду продукції допоміжного виробництва, НО продукції допоміжного виробництва / НО продукту;

$b'_{u_i}$  – питомі витрати  $s$ -го виду енергоресурсів на виробництво  $i$ -го виду допоміжної продукції, МДж/НО продукту.

Повна енергоємність енергоресурсів, що їх витрачають на транспортування вихідної продукції, сировини та матеріалів,  $e_t$  у мегаджоулях на НО виміру продукту обчислюють за формулою:

$$e_t = \sum_i \sum_j a_{t_{ij}} e_{t_{ij}}, \quad (4)$$

де  $i$  – індекс виду вихідної продукції, сировини та матеріалів;

$j$  – індекс виду транспорту;

$a_{t_{ij}}$  – обсяг перевезень вихідної продукції, сировини та матеріалів  $i$ -го виду, необхідних для вироб-

ництва одиниці продукту,  $j$ -им видом транспорту, т-км/НО продукту;

$e_{t_{ij}}$  – повна енергоємність транспортування  $i$ -го виду вихідної продукції, сировини та матеріалів  $j$ -им видом транспорту, МДж/т-км.

Зниження повної енергоємності продукту за рахунок використання утворених під час виробництва продукту горючих відходів,  $e_c$  у мегаджоулях на НО виміру продукту обчислюють за наступною залежністю:

$$e_c = \sum_i a_{c_i} e_{c_i}, \quad (5)$$

де  $a_{c_i}$  – обсяг горючих відходів  $i$ -го виду, утворених під час виробництва одиниці продукції, т/НО продукту;

$e_{c_i}$  – зниження повної енергоємності продукту за рахунок утвореної під час виробництва продукту одиниці горючих відходів  $i$ -го виду, МДж/т.

Приріст повної енергоємності, обумовлений імпортом енергоресурсів,  $e_i$  у мегаджоулях на НО виміру продукту обчислюють за формулою:

$$e_i = \sum_s b_{i_s} \left[ v_{i_s} (1 + k_{t_s}) e_v - e_s \right], \quad (6)$$

де  $b_{i_s}$  – зниження питомих витрат власних енергоресурсів  $s$ -го виду, обумовлене імпортом енергоресурсів, МДж/НО продукту;

$v_{i_s}$  – затрати валюти на імпорт  $s$ -го виду енергоресурсів, необхідних для виробництва одиниці продукту у.о./НО продукту;

$k_{t_s}$  – коефіцієнт втрат під час транспортування  $s$ -го виду енергоресурсів, відносні одиниці;

$e_v$  – повна енергоємність валюти, МДж/грошові одиниці;

$e_s$  – повна енергоємність  $s$ -го виду енергоресурсів, МДж/НО продукту.

Повна енергоємність вихідної продукції, сировини та матеріалів, необхідних для виробництва продукту,  $e_m$  у МДж на НО виміру продукту обчислюють за формулою:

$$e_m = e_{m_d} + e_{m_i} + e_{i_w}, \quad (7)$$

де  $e_{m_d}$  – повна енергоємність вітчизняних вихідної продукції, сировини та матеріалів, необхідних для виробництва одиниці продукції, МДж/НО продукту;

$e_{m_i}$  – повна енергоємність вихідної продукції, сировини та матеріалів, що імпортуються, необхідних для виробництва одиниці продукції, МДж/НО продукту;

$e_{i_w}$  – зниження повної енергоємності продукту за рахунок використання утворених під час виробництва одиниці продукції негорючих відходів, МДж/НО продукту.

Повна енергоємність основних виробничих фондів, амортизованих під час виробництва продукту,  $e_f$  у МДж/НО виміру продукту розраховують за наступною залежністю:

$$e_f = \sum_i a_{f_i} e_{f_i}, \quad (8)$$

де  $i$  – індекс виду основного виробничого фонду;

$a_{fi}$  – обсяг  $i$ -го виду основного виробничого фонду (ОВФ), амортизованого під час виробництва продукту, НО ОВФ/НО продукту;

$e_{fi}$  – повна енергоємність основного виробничого фонду  $i$ -го виду, МДж/НО ОВФ.

Повна енергоємність відтворення робочої сили під час виробництва продукту,  $e_w$  у МДж на натуральні одиниці (НО) виміру продукту обчислюють за формулою:

$$e_w = a_l e_l, \quad (9)$$

де  $a_l$  – питомі трудовитрати на виробництво продукту, з урахуванням оплати праці в галузі, люд.-год/НО продукту;

$e_l$  – повна енергоємність трудовитрат, МДж/люд.-год.

Повна енергоємність охорони навколишнього природного середовища від шкідливого впливу неперворотних відходів виробництва,  $e_e$  у МДж на НО виміру продукту розраховуємо за залежністю:

$$e_e = \sum_i a_{ei} e_{ei}, \quad (10)$$

де  $a_{ei}$  – коефіцієнт утворення неперворотних відходів виробництва  $i$ -го виду, т/НО продукту;

$e_{ei}$  – повна енергоємність усунення наслідків негативного впливу на навколишнє природне середовище тони неперворотних відходів виробництва  $i$ -го виду, МДж/т.

Індекси оцінки енергоємності продукту. Для можливості оцінки енергоємності охорони навколишнього середовища, енергоресурсів та вихідної продукції, сировини і матеріалів, пропонуємо розрахувати відповідні безрозмірні індексні показники за наступними залежностями (11)–(13):

$$J_{ECE} = \frac{e_e}{e - e_e}, \quad (11)$$

де  $J_{ECE}$  – індекс енергоємності охорони навколишнього середовища під час виробництва продукту (англ. Index of Energy Capacity of the Environment).

$$J_{ECG} = \frac{e_r}{e - e_r}, \quad (12)$$

де  $J_{ECG}$  – індекс енергоємності енергоресурсів, необхідних для виробництва продукту (англ. Index of Energy Capacity of Energy Resources).

$$J_{ECP} = \frac{e_m}{e - e_m}, \quad (13)$$

де  $J_{ECP}$  – індекс енергоємності вихідної продукції, сировини та матеріалів, необхідних для виробництва продукту (англ. Index of Energy Capacity of Product).

За допомогою розроблених індексів пропонуємо ранжувати рівень енергоємності згідно шкали наведеної в табл. 1 по кожній з трьох складових: енергоємності охорони навколишнього середовища, енергоємності

енергоресурсів та енергоємності на транспортування вихідної продукції, сировини та матеріалів.

Таблиця 1 – Залежність значення індексів  $J_i$  від рівня енергоємності

Величина індексу енергоємності	Рівень енергоємності продукту
$0 \leq J_i < 0,2$	дуже низький
$0,2 \leq J_i < 0,4$	низький
$0,4 \leq J_i < 0,6$	середній
$0,6 \leq J_i < 0,8$	високий
$0,8 \leq J_i < 1$	дуже високий

Згідно табл. 1, більшому значенню індексу енергоємності відповідає вища енергоємність продукту за  $i$ -ою складовою.

Унітарний індекс виробничої енергоємності. На основі вище наведених індексних показників розрахуємо узагальнений індекс енергоємності продукції як узагальнену функцію бажаності Гарінгтона індексів енергоємності охорони навколишнього середовища, енергоємності енергоресурсів та енергоємності вихідної продукції, сировини та матеріалів:

$$J_{ENT} = \sqrt[3]{J_{ECE} \cdot J_{ECG} \cdot J_{ECP}}, \quad (14)$$

де  $J_{ENT}$  – індекс енергоємності продукту (англ. Index of Energy Intensity of Product System).

Отримане значення індексу енергоємності продукції  $J_{ENT}$  за допомогою функції бажаності Гарінгтона переводимо до стандартної безрозмірної шкали бажаності від 0 до 1 і отримуємо унітарний індекс виробничої енергоємності продукційної системи:

$$I_{NRG} = \exp -\exp \alpha - \beta \cdot J_{ENT}, \quad (15)$$

де  $I_{NRG}$  – унітарний індекс виробничої енергоємності (англ. Unitary Index of Industrial Energy Intensity);

$\alpha$  та  $\beta$  – емпіричні коефіцієнти.

Шкала для визначення виробничої енергоємності продукту в залежності від значення унітарного індексу виробничої енергоємності  $I_{NRG}$  наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність значення  $I_{NRG}$  від рівня енергоємності

Величина індексу $I_{NRG}$	Рівень енергоємності продукту
$0 \leq I_{NRG} < 0,2$	дуже низький
$0,2 \leq I_{NRG} < 0,4$	низький
$0,4 \leq I_{NRG} < 0,6$	середній
$0,6 \leq I_{NRG} < 0,8$	високий
$0,8 \leq I_{NRG} < 1$	дуже високий

Отриманий унітарний індекс виробничої енергоємності лежить у межах  $0 \leq I_{NRG} \leq 1$ . При цьому більшому значенню індексу  $I_{NRG}$  відповідає вища енергоємність продукту.

**Висновки.** Оцінка життєвого циклу виникла як цінний інструмент підтримки прийняття рішень як для керівників державних установ, котрі відповідають за регулювання та нормування природокористування, так і для промисловості, в оцінці негативних впливів на навколишнє середовище певного продукту або процесу. Цією еволюцією у світосприйнятті керують три рушії. По-перше, відбувається рух державних норм та законодавчих актів у напрямку «підзвітності життєвого циклу». Це має на увазі, що виробник несе відповідальність не лише за прямий вплив виробництва на навколишнє природне середовище, але і за негативний вплив, пов'язаний із використаними вхідними матеріальними потоками під час виробництва, транспортування, використання продукту та захоронення продукції по завершенні часу її корисного використання. По-друге, бізнес бере участь у добровільних ініціативах, які містять етапи оцінки життєвого циклу та компоненти управління продуктом. Вони включають, наприклад, стандарти серії ISO 14000 та Програму відповідального захисту (англ. Responsible Care Program) Асоціації хімічних виробників. Все це спрямоване на сприяння постійному вдосконаленню завдяки кращим системам управління навколишнім середовищем. По-третє, екологічна «перевага» стала критерієм як на споживчих західних ринках, так і відбилась на державних закупівельних принципах розвинутих країн. Разом з цим, методам оцінки життєвого циклу надали центральну роль як інструменту для виявлення негативних впливів як самої продукції, так і матеріалів, з яких вона виробляється.

В рамках концепції оцінки життєвого циклу продукту запропонована нами методика визначення рівня виробничої енергоємності дозволяє врахувати більшість основних одиничних енергетичних потоків на етапі виробництва продукту. Енергетична складова є дуже вагомим фактором на етапі виробництва. Отриманий індексний показник дозволить порівнювати різні продукційні системи за рівнем їх енергоефективності, та за допомогою аналізу одиничних енергетичних потоків дозволить проводити оптимізацію виробництва та знаходити ланки потенційно придатні для зменшення рівня енерговитрат. З огляду на те, що енергоощадність це важливий напрямок модернізації та розвитку української економіки, використання таких індексних показників в рамках оцінки життєвого циклу продукту дозволить досягти максимальної економії матеріальних ресурсів за рахунок зменшення використання дорогих енергоносіїв на етапі виробництва продукту.

#### Список літератури

1. Бендюг В. І., Комариста Б. М., Бондаренко О. С. Зведена методологія оцінки впливу життєвого циклу продукту. Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку –

- КМХТ–2014: Збірник наук. статей 4-ї міжнар. наук.-практ. конф. Київ: НТУУ «КПІ». 2014. С. 245–250.
2. ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Second edition 2006. Switzerland. 20 p.
3. Комариста Б. М., Бендюг В. І. Алгоритм оцінки впливу життєвого циклу продукту. III Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів». 18–24 квітня 2017 р. Рубіжне. С. 42–45.
4. Бендюг В. І., Комариста Б. М. Екологічний контроль у життєвому циклі продукту. V Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- і ресурсобереження, охорона навколишнього природного середовища». 23–24 березня 2016 р. Харків. С. 89–91.
5. Проскурнин О. А., Комариста Б. Н., Бендюг В. І., Дем'янова О. О. Использование метода Монте-Карло для оценки влияния жизненного цикла продукта на состояние водных объектов. Збірник матеріалів звітної науково-практичної конференції Луганського національного аграрного університету. 20–23 лютого 2018 р. Харків, «Стильна типографія». 2018. С. 254–256.
6. ДСТУ ISO 14040:2013. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT) / Офіц. вид. К.: ТОВ «Бюро Міжнародної Сертифікації». 2013. 23 с. (Національний стандарт України).
7. Комариста Б. М., Бендюг В. І. Визначення ефективності використання природних ресурсів в межах оцінки впливу життєвого циклу продукту. Збірка тез доповідей XVII Міжнародної наук.-практич. конф. студ., асп. та мол. вчених «Екологія. Людина. Суспільство». 21–23 травня 2014 р. Київ / Уклад. Д.Е. Бенатов. К.: НТУУ «КПІ». 2014. С. 96–98.
8. Комариста Б. М., Бендюг В. І. Оцінка ресурсоефективності виробництва продукту. VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. (ECOLOGY–2017). Збірник наукових праць. 20–22 вересня 2017 р. Вінниця: БНТУ. 2017. С. 135.
9. Komarysta Bohdana, Bendyuh Vladyslav. Determining the level of resources savings of the product life cycle. Environmental problems. Vol. 2, No. 4. 2017. P. 195–198.
10. Комариста Б. М., Бендюг В. І. Визначення ресурсоефективності з використанням MIPS-аналізу у життєвому циклі продукту. Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ–2018: Збірник наукових статей Шостої міжнар. наук.-практ. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2018. С. 61–64.
11. ДСТУ 3682–98 (ГОСТ 30583–98). Методика визначення повної енергоємності продукції, робіт та послуг. Введ. 1999–01–01. К.: Держстандарт України. 1998. 11 с. (Міждержавний стандарт).
12. ГОСТ Р 51750–2001 Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Введ. 2001–05–21. М.: ИПК Издательство стандартов. 2004. 148 с. (Госстандарт России).

#### References (transliterated)

1. Bendyuh V. I., Komarysta B. M., Bondarenko O. S. Zvedena metodolohiia otsinky vplyvu zhyttievoho tsykladu produktu [Consolidated methodology for assessing the impact of product lifecycle] Komp'yuterne modeluvannya v khimii, tekhnolohiiakh i systemakh staloho rozvytku – KMKHt–2014 [Computer modeling for chemistry, technologies and sustainable development systems]: Zbirnyk nauk. statei 4-i mizhnar. nauk.-prakt. konf [Collection of scientific papers of the 4th international scientific and practical conference]. Kyiv: NTUU «KPI». 2014, pp. 245–250.
2. ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Second edition 2006. Switzerland. 20 p.
3. Komarysta B. M., Bendyuh V. I. Alhorytm otsinky vplyvu zhyttievoho tsykladu produktu [An algorithm for lifecycle impact assessing of a product]. III Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia «Aktualni problemy naukovo-promyslovoho kompleksu rehioniv» [III All-Ukrainian Scientific and Practical Conference «Actual Problems of the Scientific-Industrial Complex of the Regions»]. April 17–24, 2017. Rubizhne, pp. 42–45.
4. Bendyuh V. I., Komarysta B. M. Ekolohichniy kontrol u zhyttievomu tsykli produktu [Environmental control in the lifecycle of the product] V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Innovatsiini shliakhy modernizatsii bazovykh haluzei



- promyslovosti, enerho- i resursoberezhennia, okhrona navkolyshnoho pryrodnoho seredovyssha» [V International Scientific and Practical Conference «Innovative Ways of Modernization of Basic Industries, Energy and Resource Saving, Environmental Protection»]. March 23–24, 2016. Kharkiv, pp. 89–91.
5. Proskurnin O. A., Komaristaja B. N., Bendjug V. I., Dem'janova O. O. Ispol'zovanie metoda Monte–Karlo dlja ocenki vlijanija zhiznennogo cikla produkta na sostojanie vodnykh objektov [Using the Monte Carlo method to assess of the product lifecycle impact on the state of water bodies]. Sbornik materialov otchetnoj nauchno–prakticheskoy konferencii Luganskogo nacional'nogo agrarnogo universiteta [Collection of materials of the report scientific–practical conference of the Lugansk National Agrarian University]. February 20–23, 2018. Kharkiv, «Stil'na tipografija». 2018, pp. 254–256.
  6. DSTU ISO 14040:2013. Ekologichne upravlinnia. Otsiniuvannia zhyttievoho tsyklu. Pryntsypy ta struktura (ISO 14040:2006, IDT) [Environmental management. Lifecycle assessment. Principles and structure]. Ofits. vyd. – K.: TOV «Biuro Mizhnarodnoi Sertyfikatsii», 2013. 23 p. – (Natsionalnyi standart Ukrainy [National standard of Ukraine]).
  7. Komarysta B. M., Bendjuh V. I. Vyznachennia efektyvnosti vykorystannia pryrodnykh resursiv v mezhakh otsinky vplyvu zhyttievoho tsyklu produktu [Determining the effectiveness of using natural resources within the assessment of the lifecycle impact of the product]. Zbirka tez dopovidei XVII Mizhnarodnoi nauk.-praktich. konf. stud., asp. ta mol. vchenykh «Ekolohiia. Liudyna. Suspilstvo» [Collection of Abstracts of the XVII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Ecology. Human. Society"]. May 21–23, 2014. Kyiv / Uklad. D.E. Benatov. K.: NTUU «KPI». 2014, pp. 96–98.
  8. Komarysta B. M., Bendjuh V. I. Otsinka resursoefektyvnosti vyrobnytstva produktu [Estimation of resource efficiency of manufacturing of a product]. VI Vseukrainskyi z'izd ekolohiv z mizhnarodnoiu uchastiu. (ECOLOGY–2017). Zbirnyk naukovykh prats [VI All–Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation. (ECOLOGY–2017). Collection of scientific works]. September 20–22, 2017. Vinnytsia: VNTU. 2017, p. 135.
  9. Komarysta Bohdana, Bendjuh Vladyslav. Determining the level of resources savings of the product life cycle. Environmental problems. Vol. 2, No. 4. 2017, pp. 195–198.
  10. Komarysta B. M., Bendjuh V. I. Vyznachennia resursoefektyvnosti z vykorystanniam MIPS–analizu u zhyttievomu tsykli produktu [Determining resource efficiency using MIPS analysis in the product lifecycle]. Komp'iuterne modeliuвання v khimii ta tekhnolohiiakh i systemakh staloho rozvytku – KMKhT–2018 [Computer modeling for chemistry, technologies and sustainable development systems]. Zbirnyk naukovykh statei Shostoi mizhnar. nauk.–prakt. konf. [Collection of scientific papers of the 6th international scientific and practical conference]. Kyiv. "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". 2018, pp. 61–64.
  11. DSTU 3682–98 (HOST 30583–98). Metodyka vyznachennia povnoi enerhoiemnosti produktsii, robit ta posluh [Methodology for determining the total energy intensity of products, works and services]. Vved. 1999 01–01. K.: Derzhstandart Ukrainy. 1998, 11 p. (Mizhderzhavnyi standart [Interstate standard]).
  12. GOST R 51750–2001 Metodika opredelenija jenergoemkosti pri proizvodstve produktsii i okazanii uslug v tekhnologicheskikh jenergeticheskikh sistemakh [Method of determining energy intensity in the manufacturing of products and services in technological energy systems]. Vved. 2001–05–21. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004, 148 p. (Gosstandart Rossii [State standard of Russia]).

Надійшла (received) 20.10.2018

#### **Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Бендюг Владислав Іванович (Бендюг Владислав Иванович, Bendjuh Vladyslav Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри кібернетики хіміко–технологічних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3295-4637>; e-mail: Vladys77@gmail.com

**Комариста Богдана Миколаївна (Комаристая Богдана Николаевна, Komarysta Bohdana Mykolaivna)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри кібернетики хіміко–технологічних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-6597>; e-mail: Angel2Nika@gmail.com